

ГОРНАЯ ТЕПЛОФИЗИКА

УДК 622.015:622.33

МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ХРАНЕНИЯ МЕРЗЛОГО УГЛЯ В ЗАГЛУБЛЕННЫХ СКЛАДАХ КРИОЛИТОЗОНЫ

Ю. А. Хохолов¹, В. Л. Гаврилов²

¹Институт горного дела Севера им. Н. В. Черского СО РАН,
E-mail: khokholov@igds.ysn.ru, просп. Ленина, 43, 677980, г. Якутск, Россия

²Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН,
E-mail: gvlugorsk@mail.ru, Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

Рассмотрена целесообразность использования природного холода и особенностей криолитозоны центральных и арктических районов Якутии для хранения угля в замороженном состоянии в заглубленных складах. Выполнено моделирование теплообменных процессов с учетом климатических факторов, параметров склада, наличия теплоизоляции. Показано, что протаивание угля из-за его низкой теплопроводности происходит в меньшей степени, чем окружающих пород. При заложении склада зимой основной объем топлива будет оставаться в мерзлом состоянии в течение нескольких лет, а применение теплоизоляции значительно снизит интенсивность оттаивания поверхностного слоя. Отмечено, что по сравнению с шириной и углом наклона борта склада глубина его заложения является основным фактором, определяющим формирование размеров талой зоны к концу теплого периода хранения. Использование естественного холода в заглубленных складах снижает интенсивность окисления угля, способствует сохранению его качества, повышает энергетическую безопасность труднодоступных районов.

Уголь, хранение, окисление, криолитозона, труднодоступные районы Якутии, заглубленный склад, моделирование, теплообмен

DOI: 10.15372/FTPRPI20220109

Сложные схемы обеспечения топливом труднодоступных энергоизолированных регионов страны, включая арктические и центральные районы Якутии, предполагают необходимость длительного хранения на открытых складах местного и привозного угля, зачастую поставляемого автомобильным, речным и морским транспортом с несколькими перевалками. Время от добычи до сжигания угля может составлять более двух лет. Кроме этого, в условиях повышенных региональных требований к энергетической безопасности возникают дополнительные потребности в формировании резервных запасов топливно-энергетических ресурсов.

Известно, что при поставках твердого топлива происходят большие потери, как правило, значительно превышающие нормативные. Добытый уголь при длительных транспортировке и хранении подвергается физико-химическому выветриванию различной интенсивности и дополнительно измельчается, что ухудшает его качественные показатели со снижением теплотворной способности. При этом управление цепочками добычи, логистики и потребления из-за относительно невысокой эффективности их работы требует совершенствования [1].

В такой ситуации анализ, в том числе на основе результатов моделирования различных процессов, и поиск путей максимально возможной сохранности потребительских свойств угля и снижения его потерь из-за негативно влияющих факторов являются актуальными и важными задачами с научной и практической точек зрения. Учитывая, что добыча угля и его длительное хранение на севере страны осуществляются в экстремальных природно-климатических условиях, как правило, в зоне распространения многолетнемерзлых пород, логично использование климатических и геокриологических особенностей криолитозоны для совершенствования процесса управления качеством и потерями угля от момента его извлечения из недр до сжигания в котельных.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ КРИОЛИТОЗОНЫ В ЦЕЛЯХ СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВЛИЯНИЯ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ВЫВЕТРИВАНИЯ НА КАЧЕСТВО ХРАНЯЩЕГОСЯ УГЛЯ

Подземные и заглубленные сооружения различного назначения имеют ряд преимуществ, выгодно отличающих их от объектов, располагаемых на земной поверхности. В числе плюсов можно отметить: возможности аккумулирования, сохранения и контроля расходования тепловой энергии; изолированность от поверхностного воздействия солнечной энергии, осадков, выветривания; минимальное влияние на окружающую среду; стабильный микроклимат; снижение энергетических затрат на эксплуатацию; уменьшение количественных и качественных потерь хранимой продукции вследствие стабильности рабочих температур [2, 3].

Следует указать и минусы хранения продукции в заглубленных складах. Для организации их нормального функционирования требуется проведение дополнительных, достаточно трудоемких земляных работ, связанных с проходкой траншей в мерзлых породах; водоотведением поверхностных вод в теплое время года; потенциальной необходимостью крепления зон, примыкающих к поверхности земли; извлечением из хранилищ груза, находящегося в мерзлом состоянии. В ряде случаев это может увеличивать капитальные и эксплуатационные затраты по сравнению с открытыми складами, однако отмеченные преимущества обычно перекрывают недостатки.

Одним из эффективных и сравнительно легко реализуемых способов обеспечения сохранности угля в северных условиях является закладка его в траншеи, в том числе с теплоизоляцией верхнего слоя для защиты топлива от воздействия положительных температур, интенсивного выветривания, самонагрева и самовозгорания [4]. Использование заглубленных складов позволяет применять более экономичные средства механизации, снижать уровень пылеобразования, сокращать площади занимаемой территории для хранения в 1.5 – 2.0 раза [5].

Нестационарные теплообменные изменения, происходящие с хранимым углем в траншее и вмещающим его породным массивом, многообразны по числу и интенсивности влияющих факторов. В первую очередь они связаны с суточными и годовыми колебаниями температуры поверхности земли, периодическим подводом и отводом тепла от ее поверхности. Окисление топлива дополняет эти процессы, проходя через стадии адсорбции углем кислорода из воздуха; интенсивного окисления и насыщения угля со значительным замедлением скорости трансформационного процесса [6]. Летом скорости изменения ряда свойств угля значительно выше, чем зимой, при этом в холодное время года от уровня метаморфизма они практически не зависят [7]. Особенностью динамики эндогенных процессов в криолитозоне является то, что при отрицательных значениях температуры атмосферы и угля процесс окисления резко замедляется и может длиться очень долго [8].

Наличие рассмотренных факторов позволяет сделать вывод о целесообразности их учета при оценке возможности организации длительного (страховые запасы) и сезонного (текущее потребление с учетом разновременности использования речного, морского и автомобильного транспорта) хранения угля в районах криолитозоны с устойчивыми отрицательными среднесуточными температурами воздуха.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗАГЛУБЛЕННОМ СКЛАДЕ

Математическое моделирование тепловых процессов в горном деле является менее трудоемкой альтернативой экспериментальным работам и физическому моделированию и позволяет решать многие проблемы прогнозирования и оптимизации температурных условий в горных выработках. Методы математического моделирования успешно используются при прогнозе параметров теплового режима шахт и рудников криолитозоны [9, 10], искусственном замораживании пород при строительстве шахтных стволов [11, 12], исследованиях теплового режима тоннелей метрополитена [13–15] и т. д.

Моделирование тепловых процессов при формировании и эксплуатации заглубленного склада траншейного типа выполнено с использованием предложенной ранее методики с учетом дополнительной специфики рассматриваемых условий хранения [16]. Ее базовые положения сводятся к следующим позициям. Основная решаемая задача — расчет динамики температурного режима угольной массы, находящейся на хранении в траншее для оценки параметров образования талых зон, в которых могут активизироваться процессы, ухудшающие качество топлива. Принятые допущения: уголь закладывается в траншею зимой с температурой, равной температуре атмосферного воздуха. В расчетной области уголь в траншее отмечен штриховкой (рис. 1).

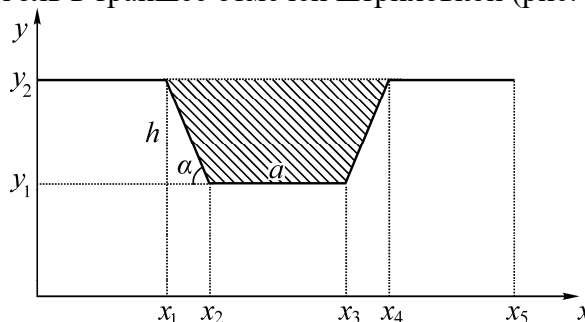


Рис. 1. Схема заглубленного склада (траншеи) для расчета динамики температурного режима хранящегося угля: a — ширина, м; h — глубина, м; α — угол откоса траншеи, град

Процесс распространения тепла в находящемся на хранении угле и породном массиве с учетом фазовых переходов влаги описывается уравнением [17, 18]:

$$\left[C(T) + L_1 W \rho \delta (T - T^*) \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right],$$

$$C(T) = \begin{cases} c_1 \rho_1, & T < T^*; \\ c_2 \rho_2, & T > T^*; \end{cases} \quad \lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1, & T < T^*; \\ \lambda_2, & T > T^*; \end{cases}$$

$$0 \leq x \leq x_5, \quad 0 \leq y \leq y_2,$$

где T — температура угля и пород, °C; T^* — температура фазовых переходов влаги в угле и породе, °C; t, x, y — временная и пространственные координаты соответственно; L_1 — скрытая теплота плавления/замерзания льда/воды, Дж/кг; W — влажность угля и породы, доли еди-

ницы; ρ — плотность воды, кг/м^3 ; c_1, ρ_1, λ_1 (c_2, ρ_2, λ_2) — удельная теплоемкость, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, плотность, кг/м^3 и коэффициент теплопроводности, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ соответственно для мерзлых/талых пород и угля; $\delta(T - T^*)$ — функция Дирака, $1/^\circ\text{C}$.

Фазовые переходы влаги в угле и породе учтены с помощью δ -функции Дирака. На глубине массива горных пород, превышающей глубину затухания колебаний температуры, температура принимается равной естественной температуре пород:

$$T = T_e, \quad 0 \leq x \leq x_3, \quad y = 0.$$

Коэффициент конвективного теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью массива пород рассчитывается с учетом скорости ветра, высоты снежного покрова и наличия теплоизолирующего слоя над углем. На дневной поверхности задается граничное условие III рода с учетом теплообмена воздуха с грунтом, теплового потока от солнечной радиации и интенсивности испарения влаги:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T - T_a(t)) - Q_R + L_2 E, \quad 0 \leq x \leq x_3, \quad y = 0,$$

где α — коэффициент теплообмена атмосферного воздуха с поверхностью массива горных пород, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$; $T_a(t)$ — температура атмосферного воздуха, $^\circ\text{C}$; Q_R — тепловой поток от солнечной радиации (радиационный баланс), $\text{Вт}/\text{м}^2$; L_2 — удельная теплота испарения воды, $\text{Дж}/\text{кг}$; E — интенсивность испарения, равная плотности диффузионного потока влаги в атмосферу, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$.

На боковых границах области задаются граничные условия II рода:

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = 0, \quad 0 \leq y \leq y_2;$$

$$\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} = 0, \quad x = x_3, \quad 0 \leq y \leq y_2.$$

Численное решение задачи теплообмена атмосферного воздуха с углем, хранящимся в траншее, и массивом вмещающих его горных пород выполнено известным методом сглаживания [18, 19], решение двумерной задачи теплообмена — методом суммарной аппроксимации [19, 20].

Прогноз тепловых процессов при хранении мерзлого угля в заглубленных складах сделан для условий Якутска и пос. Депутатского (арктическая зона Якутии) с привлечением материалов стационарных наблюдений метеостанций в этих населенных пунктах [21], а также по сведениям о годовом радиационном балансе [22].

Четвертичные отложения рассматриваемых районов представлены в верхней части разреза супесчано-суглинистыми грунтами [23]. Теплофизические расчеты проведены при следующих теплофизических свойствах: влажность грунта 15 %, плотность скелета грунта 1600 кг/м^3 , коэффициент теплопроводности талого и мерзлого грунта соответственно 1.35, 1.95 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, объемная теплоемкость талого и мерзлого грунта соответственно 2187, 1718 $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ [21]. Влажность углей принята равной 20 %, что в среднем согласуется с базовыми значениями для тех технологических марок твердого топлива, которые используются для обеспечения потребностей труднодоступных районов Якутии. При такой влажности коэффициент теплопроводности талых углей составит 0.15 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ [24]. Расчетным путем [25] определен коэффициент теплопроводности в мерзлом — 0.2 $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, объемные теплоемкости углей в талом и мерзлом состоянии — 2040 и 1650 $\text{кДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$ соответственно.

Учтено, что циклический режим испарения с поверхности земли аналогичен характеру притока солнечной радиации и соответствует режиму изменений температуры воздуха. Среднее значение испарения с поверхности суши определено по карте изолиний испарения [26]: среднегодовое испарение для Якутска составляет 360 мм, для пос. Депутатского — 150 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет начинается со второй половины января. Начальная температура закладываемого угля в траншее имеет температуру атмосферного воздуха. Повышение температуры массива происходит за счет теплообмена с атмосферным воздухом в теплый период года.

Выполненные расчеты показывают, что к концу теплого периода года глубина протаивания массива угля остается намного меньше, чем глубина протаивания окружающих грунтов, поскольку коэффициент теплопроводности угля значительно ниже. Такая ситуация фиксируется в течение всего выбранного промежутка времени (5 лет). Приведенные в качестве примера изолинии, полученные для следующих параметров траншеи: глубина 5 м, ширина 6 м, угол откоса 75° , — иллюстрируют это на первый и третий годы наблюдения (рис. 2).

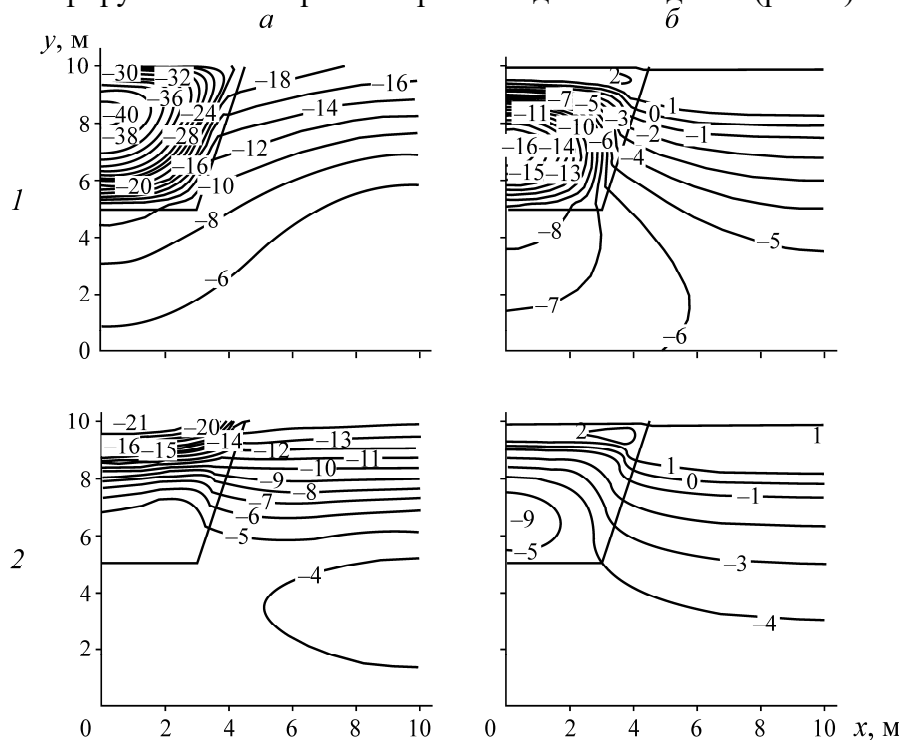


Рис. 2. Изолинии температур в заглубленном складе угля в первый (а) и третий (б) годы эксплуатации в начале апреля (1) и октября (2)

Изучение характера и особенностей ежемесячного изменения доли талой зоны в массиве угля позволяет утверждать, что этот во многом определяющий сохранность угля показатель без теплоизоляции к концу летнего периода третьего года эксплуатации увеличивается до 22.5 %. Теплоизоляция существенно снижает долю талой зоны в хранимом угле: при толщине опилок 0.1 м — до 18 %, при 0.2 м — до 13 %. Такой же результат получается при наличии теплоизоляции из пенополистирола толщиной 0.1 м. Начиная с третьего года эксплуатации заглубленного склада, годовые колебания доли талой зоны в нем практически не меняются (рис. 3).

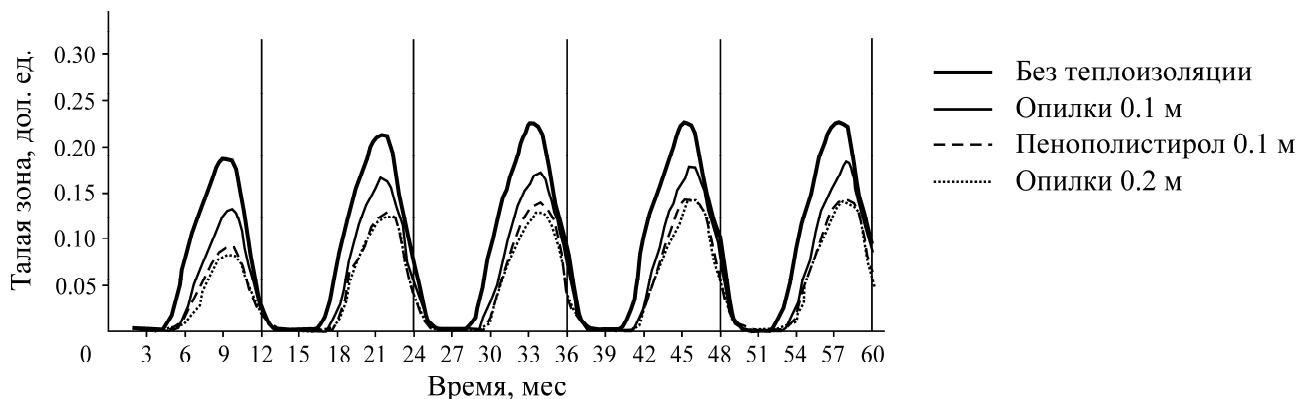


Рис. 3. Динамика образования талой зоны в заглубленном складе угля для условий г. Якутска

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что геометрические параметры складов оказывают влияние на долю талого угля, находящегося на хранении. Доли талой зоны при разных углах откоса траншеи (рассматривалось три варианта — 90, 75 и 50°) меняются незначительно в пределах 2–5 % в период от 1 до 5 лет. Чем круче угол откоса траншеи, тем меньше доля талой зоны в навале угля. Результаты расчетов доли талой зоны при разных ширинах траншеи без теплоизоляции и при ее наличии показывают, что чем шире траншея, тем ниже доля талой зоны. Для глубины траншеи 5 м и углом откоса в 75° доля талого угля в разные годы (с 1-го до 5-го) без теплоизоляции составляет 28–30 % при ширине траншеи 2 м, при ширине 6 м — 18–22 %. С теплоизоляцией из опилок толщиной 0.2 м соответственно 11–18 и 8–13 %.

Моделирование выявило, что глубина заложения траншеи оказывает значимое влияние на развитие талой зоны. Ее доля к третьему году эксплуатации без теплоизоляции при глубине траншеи 2 м достигает 56 %, при глубине 5 м — 22 %, при глубине 8 м — 15 % (рис. 4).

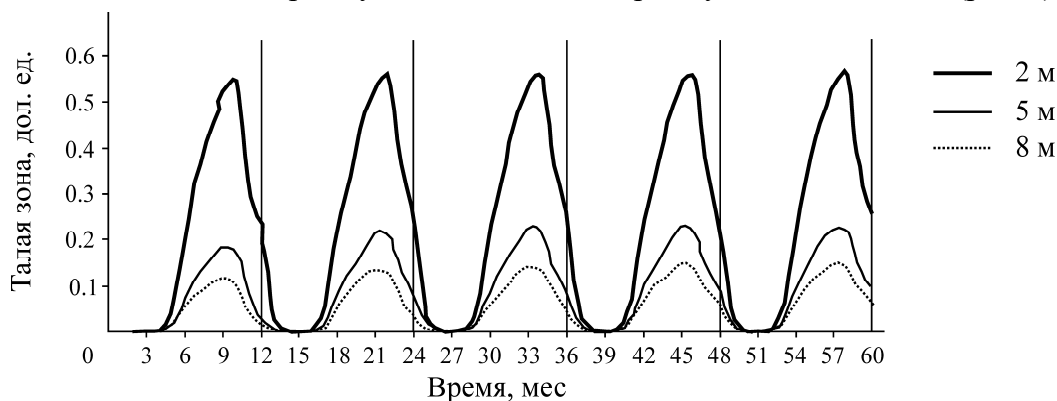


Рис. 4. Динамика образования талой зоны в заглубленном складе угля при разных глубинах траншеи без теплоизоляции угля для условий г. Якутска

Выполненные аналогичные расчеты при наличии теплоизоляции из опилок толщиной 0.2 м также демонстрируют преимущество более глубокого заложения складов. При глубине траншеи 2 м доля талой зоны к концу лета достигает 35 %, при глубине 5 м — 12 %, при глубине 8 м — 8 %.

Расчеты динамики изменения температурного режима угля в заглубленных складах для условий пос. Депутатского (арктическая зона Якутии) показали, что из-за более жестких и холодных климатических условий доля талой зоны в хранимом угле без теплоизоляции уменьшается к концу третьего года с 18.0–22.5 % в Центральной Якутии до 5.0–8.0 % в условиях Заполярья (рис. 5), где отсутствие теплоизоляционного слоя над хранимым углем не так значимо.

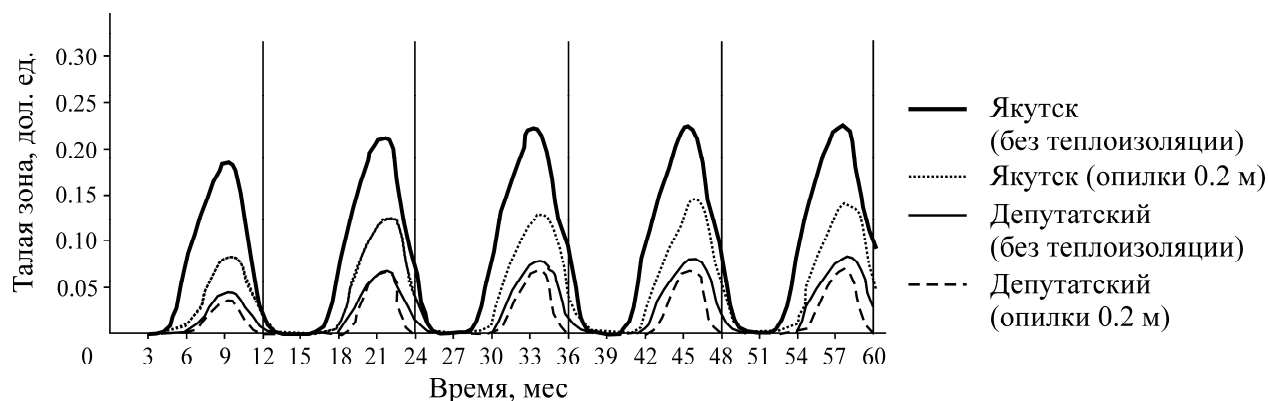


Рис. 5. Динамика изменения талой зоны без теплоизоляции и с теплоизоляцией в заглубленном складе

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ АСПЕКТЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗАГЛУБЛЕННЫХ СКЛАДОВ УГЛЯ

Полученные при выполнении исследований данные дополняют ранние результаты [16, 27] и ориентируют на разработку адаптированных к региональной специфике технологических и организационно-экономических мер совершенствования взаимодействия добычи, логистики и поставок привозного и местного угля.

Управляемое использование естественного, атмосферного и аккумулированного грунтами холода в районах Крайнего Севера позволяет обеспечить длительную сохранность добытого угля. Это достигается за счет его закладки в зимний период в замороженном виде в траншейные заглубленные склады, в которых может быть обеспечен круглогодичный отрицательный температурный режим.

По сравнению с хранилищами на поверхности земли, в заглубленных складах в теплое время года потери холода значительно меньше. Вмещающие породы отдают часть накопленного холода внутрь траншей, из-за чего температура стабилизируется и обеспечивается достаточно устойчивый режим в течение как минимум 5 лет. Возведение теплозащитного покрытия позволяет намного снизить интенсивность оттаивания верхнего слоя углей, находящихся в таких складах в летний период, и образования талых зон, что способствует уменьшению развития негативных процессов физико-химического выветривания угля.

Сооружение заглубленных и полуглубленных складов, их эксплуатация и, в случае потребности, консервация (рекультивация) возможны с использованием большого количества технологических схем, которые должны быть максимально адаптированы к конкретным условиям. В качестве средств механизации могут использоваться экскаваторы, бульдозеры-рыхлители, погрузчики требуемой производительности. Их эксплуатация при необходимости может дополняться буровзрывными работами на рыхление и выброс.

Следует выбирать возвышенные участки при строительстве складов для минимизации рисков затопления поверхностными и тальми водами. Теплоизоляция складов может выполняться с применением как привозных материалов (например, полистирола, вспенивание которого возможно непосредственно на складских участках), так и местных (опилки, мох, шлак и т. д.).

Технология строительства, эксплуатации и организации работы складов, их параметры и режим работы могут отличаться в различных районах размещения. Все это должно быть синхронизировано с общими целями процесса добычи и поставок угля потребителям, которые должны работать как единая система в режиме комплексного управления качеством. Целесообразно выполнить подробное технико-экономическое сравнение вариантов хранения угля в заглубленных и открытых складах в разных горно-геологических условиях с использованием альтернативных видов оборудования.

ВЫВОДЫ

За счет управляемого использования естественного холода криолитозоны возможно обеспечить длительную сохранность угля путем закладки его на хранение в зимний период в замороженном виде в заглубленные склады, в которых может быть обеспечен круглогодичный отрицательный температурный режим. К концу теплого периода года глубина протаивания хранимого в таких складах угля из-за его более низкой теплопроводности остается намного меньше, чем в окружающих породах.

Доля талой зоны в хранимом угле, во многом определяющая сохранность угля, без теплоизоляции к концу летнего периода третьего года эксплуатации при рассмотренных условиях доходит до 22.5 %, с теплоизоляцией опилками толщиной в 0.1 и 0.2 м она снижается до 18 и 13 % соответственно. Геометрические параметры склада (ширина, угол наклона борта, глубина заложения) — основные факторы, определяющие долю зоны талого угля, находящегося на хранении, а наиболее значимым является глубина склада: ее увеличение с 2 до 5–8 м ведет к снижению доли талого угля к концу теплого периода года в 2–3 раза как для варианта с теплоизоляцией, так и без нее.

Более жесткие и холодные климатические условия заполярной части Якутии способствуют тому, что доля талой зоны в хранимом угле без теплоизоляции уменьшается к концу третьего года до 5.0–8.0 %. Влияние теплоизоляционного слоя над хранимым углем становится менее значимым.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаврилов В. Л., Хохолов Ю. А., Федоров В. И. О влиянии условий доставки угля в труднодоступные северные районы на его потребительские свойства // *Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук*. — 2019. — Т. 6. — № 3. — С. 219–225.
2. Курилко А. С., Киселев В. В., Хохолов Ю. А., Романова Е. К. Регулирование теплового режима подземных сооружений складского и специального назначения в условиях Севера. — Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН. — 2011. — 246 с.
3. Алпатов С. Н. Преимущества подземного строительства с точки зрения энергоэффективности // *Федеральный строительный рынок*. — 2011. — № 97. URL: <http://fsr-stroy.ru/archive/10883> (дата обращения 14.07.2021 г.).
4. Хрисанфова А. И., Литвинов В. Л. Технология хранения углей и мероприятия по сокращению потерь топлива. — М.: Недра, 1970. — 192 с.
5. Ильин В. В., Фомин Е. И. Анализ технологии перевалки угля с применением крытых заглубленных складов в морских и речных портах // *Сб. докл. науч.-техн. конф. “Интерстроймех-2018”* (Москва, 8–12 октября 2018 г.). — М.: НИМГСУ, 2018. — С. 342–344.
6. Мирошниченко Д. В., Дроздник И. Д., Кафтан Ю. С., Иванова Е. В., Сорокотяга К. Н., Десна Н. А. Исследование кинетических характеристик окисления углей // *Кокс и химия*. — 2012. — № 3. — С. 6–15.
7. Мирошниченко Д. В., Десна Н. А., Кафтан Ю. С. Исследование процесса окисления углей в промышленных условиях. Сообщ. 4. Температура угля в штабеле // *Кокс и химия*. — 2015. — № 2. — С. 2–8.
8. Чemezov Е. Н., Федорова С. Е. О снижении пожароопасности на угольных разрезах Севера // *Вестн. ЯГУ*. — 2005. — № 4. — С. 101–106.
9. Васильев П. Н., Курилко А. С., Хохолов Ю. А., Шерстов В. А. Тепловой режим угольных шахт Якутии и способы его регулирования. — Якутск: ЯНЦ СО РАН, 2009. — 240 с.

10. Хохолов Ю. А., Соловьев Д. Е. Методика совместного расчета температурного и вентиляционного режимов нестационарной сети горных выработок криолитозоны // ФТПРПИ. — 2013. — № 1. — С. 138–145.
11. Головатый И. И., Левин Л. Ю., Паршаков О. С., Диулин Д. А. Оптимизация процессов формирования ледопородного ограждения при сооружении шахтных стволов // Горн. журн. — 2018. — № 8. — С. 48–53.
12. Левин Л. Ю., Семин М. А., Плехов О. А. Сравнительный анализ существующих методов расчета толщины ледопородного ограждения строящихся шахтных стволов // Вестн. ПНИПУ. Строительство и архитектура. — 2018. — Т. 9. — № 4. — С. 93–103.
13. Кияница Л. А., Лугин И. В., Красюк А. М. Пути обеспечения температурных режимов протяженных транспортных тоннелей БАМ в холодный период года // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. — 2020. — Т. 7. — № 1. — С. 298–303.
14. Красюк А. М., Лугин И. В., Пьянкова А. Ю. Определение размеров массива грунта, подверженного тепловому влиянию подземных станций и тоннелей метрополитена // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 122–128.
15. Красюк А. М., Лугин И. В., Пьянкова А. Ю. Исследование температур грунта, окружающего станцию метрополитена мелкого заложения // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 64–74.
16. Хохолов Ю. А., Гаврилов В. Л., Федоров В. И. Математическое моделирование теплообменного процесса хранения мерзлого угля на открытых складах // ФТПРПИ. — 2019. — № 6. — С. 172–182.
17. Тихонов А. Н., Самарский А. А. Уравнения математической физики. — М.: Наука, 1977. — 736 с.
18. Самарский А. А., Моисеенко Б. Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычисл. матем. и матем. физики. — 1965. — Т. 5. — № 5. — С. 816–827.
19. Самарский А. А. Теория разностных схем. — М.: Наука, 1983. — 616 с.
20. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. — М.: Едиториал УРСС, 2003. — 784 с.
21. Фельдман Г. М., Тетельбаум А. С., Шендер Н. И., Гаврильев Р. И. Пособие по прогнозу температурного режима грунтов Якутии. — Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1988. — 240 с.
22. Радиационный баланс. [Электронный ресурс]. URL: <https://geographyofrussia.com/radiacionnyj-balans/> (дата обращения 20.05.2021 г.).
23. Вотяков И. Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. — Новосибирск: Наука, 1975. — 177 с.
24. Агроскин А. А. Теплофизика твердого топлива. — М.: Недра, 1980. — 256 с.
25. Гаврильев Р. И., Кузьмин Г. П. Определение теплофизических характеристик мерзлых грунтов расчетным методом // Наука и образование. — 2009. — № 4. — С. 51–54.
26. Среднегодовые осадки в России. Испаряемость. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.protown.ru/information/hide/2850.html> (дата обращения 20.05.2021).
27. Каймонов М. В., Панишев С. В. Прогноз температурного режима вскрышных горных пород карьеров криолитозоны // ГИАБ. — 2015. — № 3. — С. 75–80.

Поступила в редакцию 23/VII 2021

После доработки 15/X 2021

Принята к публикации 24/XII 2021